

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 196 40 594.7  
**Anmeldetag:** 01. Oktober 1996  
**Anmelder/Inhaber:** Siemens Aktiengesellschaft,  
München/DE

Erstanmelder: Dr. K. Michael Kelly,  
Freising/DE; Dr. Oliver Ambacher,  
Professor Dr. Martin Stutzmann  
und Robert Handschuh, Garching/DE;  
Dr. Martin S. Brandt und Roman  
Dimitrov, München/DE.

**Bezeichnung:** Licht-induzierte Grenzflächenzersetzung zur  
Strukturierung und Trennung von Halbleiter-  
materialien

**IPC:** H 01 L 21/268

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 31. Januar 2002  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
Im Auftrag

Wehrner

RECEIVED  
MAR 19 2002  
TC 2800 MAIL ROOM

## **Licht-induzierte Grenzflächenzersetzung zur Strukturierung und Trennung von Halbleitermaterialien**

### **Patentansprüche**

5

1. Ein Verfahren zur Trennung zweier ungleicher Halbleitermaterialien oder Halbleiterschichten voneinander oder eines Halbleitermaterials oder einer Halbleiterschicht von einem Substrat durch Bestrahlung mit Licht, das an oder in der Nähe der Grenzfläche zwischen den zwei zu trennenden Materialien absorbiert wird.
- 10 2. Ein Verfahren nach Anspruch 1, bei dem an der Grenzfläche eine weitere, für diesen Zweck eingebaute Halbleiterschicht das Licht absorbiert und als Opferschicht benutzt wird.
- 15 3. Ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Energie des absorbierten Lichtes in Form von Wärme die Trennung induziert.
4. Ein Verfahren nach Anspruch 3, wobei das Licht in einem Teil des Halbleitermaterials oder der Halbleiterschicht oder im Substrat absorbiert wird und die Energie in Form  
20 von Wärme in eine temperaturempfindliche Opferschicht diffundiert.
5. Ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 oder 3 oder 4, in dem die Energie des absorbierten Lichtes eine Zersetzung der Grenzfläche oder Opferschicht induziert, die zu einer Gasentwicklung auf Grund von chemischen Reaktionen, Sublimation, oder sonstigem  
25 Austreten von Gasen führt, welche die Trennung erleichtert.
6. Ein Verfahren nach Anspruch 2, in dem die Opferschicht so gewählt ist, daß ihre optische Bandlücke kleiner ist als die Bandlücke entweder des Substrats und evtl. Zwischenschichten oder des abzutrennenden Halbleitermaterials.
- 30 7. Ein Verfahren nach Anspruch 2, in dem die Schichtdicke der Opferschicht für die Absorption des zur Trennung benutzten Lichtes optimiert ist.

8. Ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 oder 3 oder 4 oder 5, in dem das Licht durch das Substrat auf die Grenzfläche oder Opferschicht fällt.
9. Ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 oder 3 oder 4 oder 5, bei dem die Beleuchtung in Form eines oder mehrerer Lichtpulse realisiert wird.
10. Ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 oder 3 oder 4 oder 5, bei dem mit Hilfe zweier oder mehrerer kohärenter Laserstrahlen ein Interferenzmuster in der Beleuchtung realisiert wird, das zu einer höheren lokalen Lichtintensität führt als bei homogener Beleuchtung mit gleicher Energie.
11. Ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 oder 3 oder 4 oder 5, wobei eine laterale Strukturierung erreicht wird mittels Beleuchtung durch eine gemusterte Maske, Beleuchtung mit dem Interferenzmuster zusammengebrachter kohärenter Lichtstrahlen, Holographie, oder durch serielle oder gleichzeitige Beleuchtung verschiedener ausgewählter Stellen der Schicht.
12. Ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 oder 3 oder 4 oder 5, in der die abgetrennte oder zurückbleibende Halbleiterschicht eine Schichtstruktur, Schichtfolge, oder Bauelementstrukturen beinhaltet.
13. Ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 oder 3 oder 4 oder 5, bei dem die Halbleiterschicht, Schichtfolge, oder Bauelementstrukturen zur mechanischen Stabilisierung auf ein Trägermaterial angebracht werden.
14. Ein Verfahren aus der Gruppe der Ansprüche 1 bis 13, in dem die Halbleiterschicht oder ggf. die Opferschicht vollständig oder teilweise aus GaN, AlN, InN, oder ihren Mischkristallen, oder Schichtfolgen oder Schichtstrukturen oder Bauelementen daraus bestehen.
15. Ein Verfahren nach Anspruch 14, in dem das Substrat Saphir,  $\text{LiAlO}_2$ ,  $\text{LiGaO}_2$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{ScAlMgO}_4$  oder SiC ist.

16. Ein Verfahren nach Anspruch 14 und 15, in dem eine Schicht aus GaN oder  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  von einem Saphirsubstrat getrennt wird mittels Beleuchtung durch das Substrat mit der dritten Harmonischen eines Nd:YAG Lasers bei der Wellenlänge von 355 nm.
- 5 17. Ein Verfahren nach Anspruch 16, bei dem der Nd:YAG Laser mit Hilfe eines Q-Switches gepulst wird.
18. Freistehende Schichten oder Schichtfolgen, die von dem Substrat, worauf sie gewachsen wurden, mittels eines oder mehrerer Verfahren aus der Gruppe der Ansprüche 1 bis 10 17 getrennt worden sind.
- 15 19. Freistehende Bauelemente, eingeschlossen Dioden, lichtemittierende Dioden (LEDs), Halbleiterlaser, Transistoren, und Detektoren, die während oder nach ihrer Herstellung mittels eines oder mehrerer Verfahren aus der Gruppe der Ansprüche 1 bis 17 getrennt worden sind.
- 20 20. Schichten oder Schichtfolgen nach Anspruch 18 und Bauelemente nach Anspruch 19, die auf anderen Trägermaterialien angebracht werden.
- 20 21. Bauelemente nach Anspruch 19 oder 20, bei denen auf der durch das Trennungsverfahren neu freigelegten Oberfläche elektrische Kontakte aufgebracht werden.
- 25 22. Halbleiterlaser nach Anspruch 19 oder 20, mit einem optischen Resonator, der durch Spalten der freistehenden Schichtfolge entlang kristallographischer Netzebenen der epitaktischen Schichten hergestellt wird.
23. Freistehende Halbleitermaterialien nach Anspruch 18 oder 20, die als Substrate für das weitere Wachstum von Halbleiterschichten benutzt werden.
- 30 24. Bauelemente, hergestellt nach Anspruch 11 oder 12, die ausgehend von der nach der Trennung auf dem Substrat zurückbleibenden Schicht hergestellt werden.

25. Optische Bauelemente hergestellt mit einem oder mehreren Verfahren aus der Gruppe der Ansprüche 1 bis 17, eingeschlossen Beugungsgitter, Dünnschichtfilter, Lichtkoppler und Wellenleiter.
- 5 26. Vorrichtungen aus der Gruppe der Ansprüche 18-25, dadurch charakterisiert, daß sie teilweise oder vollständig aus GaN, AlN, InN, ihren Mischkristallen, oder Schichtfolgen daraus, bestehen.

## Beschreibung

5 Licht-induzierte Grenzflächenzersetzung zur Strukturierung und Trennung von Halbleitermaterialien.

Die Herstellung von Produkten aus Halbleitern, wie elektronische und optoelektronische Bauelemente, bedarf typischerweise mehrerer Prozessschritte, einschließlich den zum Wachstum von Halbleiterkristallen und Halbleiterschichten notwendigen Prozessen, und zur  
10 örtlich selektiven Entfernung und Strukturierung der Schichten. Viele Bauelemente bestehen zum Teil aus Schichtfolgen von ungleichen Materialien, die in Einkristallform epitaktisch auf einem Substrat gewachsen werden.

Als Prozessschritt für Strukturierung und Materialentfernung wird meist ein Ätzverfahren  
15 benutzt, das auf die Halbleiteroberfläche wirkt. Solche Prozesse sind oft langsam und benötigen korrosive Chemikalien. Darüberhinaus sind diese Methoden nicht im allgemeinen in jedem Materialsystem einsetzbar. Insbesondere sind die Halbleiter Indium-, Gallium- und Aluminiumnitrid (InN, GaN und AlN), und ihre Mischkristalle oder Legierungen, die im folgenden Text mit „Gruppe III-Nitriden“ zusammengefaßt werden, sehr schwierig zu ätzen.  
20 Kein zuverlässiges naßchemisches Ätzverfahren steht in diesem Materialsystem zur Verfügung, so daß das relativ komplizierte und teure Verfahren des Reaktiv-Ionen-Ätzens eingesetzt wird. Diese Methode erlaubt nur relativ geringe Ätzraten und benötigt giftige und toxische Gase (z.B. Bortrichlorid). Weil Ätzverfahren auf die Oberfläche wirken, ist es meist nötig, die Ätzrate und -dauer genau zu kontrollieren, um die gewünschte Tiefe zu  
25 erreichen.

Das zum Wachstum verwendete Substrat hat nicht immer gute Eigenschaften für nachfolgende Prozessschritte oder für den Betrieb des Bauelements. Die erfolgreichsten Halbleitertechnologien benutzen deshalb zum Wachstum von Halbleitern Substrate aus denselben  
30 oder gitterangepaßten Materialien. Als Beispiel werden Scheiben aus GaAs für das Wachstum von Schichten aus GaAs oder Mischkristallen aus AlAs, GaAs, und InAs benutzt. Für manche Halbleitermaterialien aber, zum Beispiel und insbesondere für die Gruppe III-Nitride, stehen solche Volumenkristalle als Substrat nur in sehr beschränktem Maß zur Ver-

fügung. Als Ersatz werden andere Stoffe als Substrat benutzt, wie Saphir und Siliziumkarbid im Falle der Gruppe III-Nitride. Diese Substrate bringen Probleme wie unpassende Atomgitterabstände und unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten mit sich, die sich negativ auf die Materialqualität der auf ihnen gewachsenen Halbleiter auswirken. Dazu  
5 sind manche Prozessschritte, wie das Spalten zur Herstellung von Resonatorspiegeln, die z.B. erfolgreich zur Herstellung von Laserdioden aus GaAs benutzt werden, schwierig oder unmöglich mit diesen Substraten.

Aus diesen Gründen ist es wünschenswert eine neue Technologie zu besitzen, die es erlaubt,  
10 Halbleiterschichten voneinander zu trennen oder von ihrem Substrat abzulösen. Zur Zeit stehen dazu die im folgenden zusammengefaßten Technologien zur Verfügung:

1. Einige spezifische Methoden zur Trennung von Schichten im Bereich der Halbleitertechnologie wurden bereits patentiert oder veröffentlicht.
- 15 (i) Im Materialsystem GaAs/AlAs werden im Herstellungsprozeß der Bauelemente AlAs Opferschichten implementiert, die naßchemisch aufgelöst werden können. Dies ermöglicht die Trennung von Schichten oder Strukturen vom Substrat (E. Yablonovitch et al., Appl. Phys. Lett. 51, 2222 (1987), U.S. Patent 4,846,931, Thomas J. Gmitter and E. Yablonovitch, 11. Juli 1989). Diese Methode ist wegen der geringen lateralen Ätzgeschwindigkeit sehr zeitaufwendig. Für Gruppe III-Nitride gibt es keine naßchemische Ätzen.  
20
- (ii) Eine Methode zur Entfernung von Metallfilmen wurde von Baber beschrieben (U.S. Patent 4,448,636, S.C. Baber, 15. Mai 1984). Hierbei wird der Metallfilm durch Licht erhitzt. Eine organische Opferschicht zwischen Substrat und Metallfilm wird durch die  
25 zugeführte Wärme verdampft und erlaubt die Entfernung der Metallschicht. Die Verwendung von organischen Zwischenschichten ist bei dem epitaktischen Wachstum von Gruppe III-Nitriden nicht einsetzbar.
- (iii) Eine vergleichbare Methode wurde zur Entfernung von Siliziumdioxid-Schichten von Galliumarsenid beschrieben. Auch in diesem Falle wurde eine organische Zwischenschicht durch Lichtabsorption erhitzt und die SiO<sub>2</sub> Schicht abgehoben (Y.-F. Lu, Y. Aoyagi, Jpn. J. Appl. Phys. 34, L1669 (1995)).  
30
- (iv) Von der gleichen Arbeitsgruppe existiert eine Veröffentlichung über die Separation von SiO<sub>2</sub> Streifen von GaAs mit Hilfe eines Excimer-Lasers. Die mikroskopische Wirkungs-

weise des Excimer Laserlichts auf die Grenzfläche des  $\text{SiO}_2$  blieb unverstanden und ist spezifisch für dieses Materialsystem (Y.-F. Lu et al., Jpn. J. Appl. Phys. **33**, L324 (1994)). Diese Verfahren lassen sich jedoch nicht offensichtlich auf Gruppe III-Nitride oder andere kristalline Systemen übertragen.

5

2. Laser Ablation ist auf viele Materialsysteme angewandt worden um Material zu entfernen. Jedoch wird bei dieser Methode immer die Oberfläche destruktiv abgetragen, eine Trennung in zwei weiter zu verwendende Teile ist nicht möglich.

10

3. Spezifisch für Gruppe III-Nitride ist das Ätzen von GaN mit einem Laserpuls unter HCl-Gas von Leonard und Bedair (Appl. Phys. Lett. **68**, 794 (1996)) beschrieben worden und auf eine photochemische Reaktion unter Beteiligung von Salzsäure zurückgeführt worden.

15

4. Die thermisch aktivierte Zersetzung von GaN wurde durch Morimoto 1974 beschrieben (Morimoto, J. Electrochem. Soc. **121**, 1383 (1974), Groh et al., physica status solidi (a) **26**, 353 (1974)).

20

5. In eigenen Arbeiten wurde gezeigt, daß Gruppe III-Nitride laserinduziert zu thermisch aktivierter Zersetzung gebracht werden können. Diese Untersuchung ist bei Appl. Phys. Lett. zur Publikation eingereicht worden. Es handelt sich bei diesem Verfahren jedoch ebenfalls um ein auf die Oberfläche wirkendes Verfahren, daß insbesondere auch zu der Zerstörung der Oberfläche führt.

25

Das im Anspruch 1 beschriebene Verfahren ist eine Alternative zu naß- und trockenchemischen Ätzprozessen, wie sie in der Halbleitertechnologie zur Strukturierung und Herstellung von einzelnen Schichten und Bauelementen eingesetzt werden, und unterscheidet sich von diesen grundsätzlich dadurch, daß es direkt auf einer internen Grenzfläche statt auf der freien Oberfläche wirkt. Dies erlaubt es unter anderem, die gewünschte Strukturierungstiefe direkt zu realisieren statt z.B. sie mit Kontrolle der Ätzdauer erreichen zu müssen. Die Oberfläche muß auch nicht zerstört werden. Dies führt zu einer neuen Möglichkeit, Schichtsysteme voneinander oder von dem Substrat zu lösen. Freistehende Bauelemente oder Schichten besitzen Vorteile bei weiteren Prozeßschritten; sie eignen sich z. B. als Substrate für die Homoeptaxie ohne die Probleme der Gitterfehlانpassung und der Differenzen in den

30



thermischen Ausdehnungskoeffizienten, oder zur Herstellung von optischen Bauelementen (Laserdioden) durch die Möglichkeit des Spaltens, unabhängig von der Substratspaltbarkeit. Der Transfer von Schichten und Bauelementen aus Gruppe III-Nitriden auf andere Substrate ermöglicht die Kompatibilität und Integration von Gruppe III-Nitriden mit anderen technologisch relevanten Halbleitersystemen wie Silizium.

Das Verfahren ermöglicht die Trennung von Schichten eines Schicht-Substrat Systems durch die direkte, sehr lokale Wirkung auf interne Grenzflächen. Allgemein kann das hier beschriebene Verfahren auf Materialsysteme angewendet werden, in denen die zu trennende Grenzfläche mit Licht erreichbar ist, das Licht von einem Material an dieser Grenzfläche absorbiert wird, und in denen ein Material in der Grenzflächennähe sich durch die Absorption vom Licht oder Lichtpulsen zersetzen läßt. Das Verfahren wird erleichtert, wenn mindestens ein Zersetzungsprodukt gasförmig ist. Als Halbleiter für diesen Prozeß eignen sich u.a. die Gruppe III-Nitriden, oxidische Materialien, und  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Die einfachste Verwirklichung des Verfahrens ist in Abb. 1 gezeigt. Hierbei wird ein System aus zwei Halbleitermaterialien mit einem Lichtstrahl durch Material (2) hindurch bestrahlt und das Licht in Halbleitermaterial (4) stark absorbiert. Die dabei absorbierte Energie induziert eine Zersetzung des Halbleitermaterials (4), so daß es zu einer Trennung der beiden Materialien kommt. Zersetzungsmechanismen können z. B. Sublimation oder chemische Reaktionen sein. Die Zersetzung kann dabei sowohl thermisch wie photochemisch initiiert werden. Die Trennung wird besonders unterstützt, wenn bei der Zersetzung gasförmige Produkte entstehen. Es ist jedoch auch möglich, daß die in Halbleitermaterial (4) absorbierte Energie in das Halbleitermaterial (2) diffundiert und dort die Zersetzung stattfindet. Die relative Dicke der beiden Halbleitermaterialien kann dabei stark variieren, und ist nicht notwendigerweise wie in den Abbildungen dargestellt.

Eine viel verwendete Methode Halbleitermaterialien herzustellen ist das Aufwachsen auf Substraten. Im Bezug auf das hier dargestellte Verfahren ist die Unterscheidung zwischen Substrat und Halbleitermaterial nicht relevant. Eine Möglichkeit ist, daß die Halbleitermaterialien (2) und (4) auf einem Substrat gewachsen sind, und die Trennung an der Grenzfläche zwischen (2) und (4) stattfindet. Es ist jedoch auch möglich, mit dem hier beschriebenen Verfahren die Halbleitermaterialien direkt von dem Substrat zu trennen, wie in Abb. 2 dar-

gestellt. In diesem Falle tritt das Substrat (6) an die Stelle des Halbleitermaterials (2). Dabei kann die Beleuchtung durch das Substrat (6) geschehen, die Lichtenergie wird in diesem Fall im Halbleitermaterial (4) absorbiert. Je nach den Absorptionseigenschaften kann es jedoch auch möglich sein, die Grenzfläche durch das Halbleitermaterial (4) zu beleuchten, so daß das Substrat die Lichtenergie absorbiert. Wie oben bereits dargestellt ist es jedoch nicht notwendig, daß die Zersetzung in dem absorbierenden Teil der Struktur stattfindet, die Energie kann ggf. auch in den anderen Teil diffundieren und dort die Zersetzung bewirken.

Die Halbleitermaterialien (2) und (4) können entweder homogene Schichten aus einem Halbleiter sein, oder aus Schichtfolgen verschiedener Halbleiter bestehen, wie am Beispiel von Material (4) in Abb. 3 dargestellt. In diesen Schichtfolgen kann gegebenenfalls bereits ein konkretes Bauelement vor- oder fertig prozessiert vorliegen, auch in Form eines integrierten elektronischen oder optoelektronischen Schaltkreises. Alle diese Strukturen sollen im Sinne der Anmeldung als Halbleitermaterial verstanden werden.

Um die Absorption des Lichtes an der zu trennenden Grenzfläche zu verbessern und gezielt zu beeinflussen, kann eine besonders absorbierende Schicht (8) eingefügt werden, entweder zwischen die beiden Halbleitermaterialien (2) und (4), wie in Abb. 4 gezeigt, oder zwischen Halbleitermaterial (4) und Substrat (6). Eine Möglichkeit der Ausführung besteht darin, ein Halbleitermaterial in der Schicht (8) zu benutzen, das eine optische Bandlücke unterhalb derer der umgebenden Materialien hat. Die Halbleiterschicht (8) kann nun selbst zersetzt werden und dann als eine Opferschicht wirken. Es ist aber auch möglich, daß die absorbierte Energie diffundiert und in der Nähe der Schicht (8) zu einer Trennung führt. Möglich ist auch, daß die Energie in der Schicht (4) absorbiert wird, diese jedoch zu stabil ist um zersetzt zu werden. In diesem Falle kann die Halbleiterschicht (8) so gewählt werden, daß sie sich besonders einfach zersetzt, also wiederum als Opferschicht fungiert. Ein besonderer Vorteil des hier beschriebenen Verfahrens ist, daß die Halbleiterschicht (8) kristallin und gitterangepaßt sein kann.

Das Licht muß so gewählt werden, daß es die zu trennende Grenzfläche erreichen kann und dort ausreichend absorbiert wird. Dies kann im einfachsten Fall durch Beleuchtung mit einer Lampe, ggf. nach Filterung, geschehen. Reicht der so zur Verfügung stehende Photonenfluß nicht aus, so kann die Beleuchtung auch mit einem geeigneten Laser durchgeführt werden.

Besonders im Fall einer thermischen Zersetzung kann wegen der thermischen Leitfähigkeit der Materialien schnell die Wärme aus dem zu zersetzenden Bereich wegdiffundieren. Es kann deshalb notwendig sein, die Lichtenergie in Form sehr kurzer Lichtpulse zuzuführen, um trotzdem die für die Zersetzung notwendige Temperatur zu erreichen.

5

Das hier beschriebene Verfahren kann auch zur lateralen Strukturierung eingesetzt werden. Dies kann durch verschiedene Vorgehensweisen realisiert werden. Ein fokussierter Lichtstrahl kann benutzt werden um sequentiell räumlich getrennte Punkte des Materials zu beleuchten und zur Zersetzung zu bringen. Eine Beleuchtungsmaske (10) kann eingesetzt werden, durch die ausgewählte Flächen der Probe entfernt werden können (Abb. 5). Schließlich ist die Beleuchtung durch holographische Methoden (z.B. Beleuchtung mit einem Interferenzgitter) möglich, bei der Interferenzeffekte ausgenutzt werden mittels gleichzeitiger Beleuchtung mit mehr als einem kohärenten Strahl (Abb. 6).

10

Der durch die Grenzflächenzersetzung abgetrennte Teil kann sehr dünn oder klein sein und somit mechanisch instabil und schlecht zu handhaben. Es ist möglich, diesen Teil vor, ggf. auch nach der Trennung auf eine neue Trägermaterial aufzubringen, z.B. durch Kleben. Dies ist für den Fall des Fixierens vor der Grenzflächenzersetzung in Abb. 7 exemplarisch dargestellt (Trägermaterial (14) und Klebstoff (12)). Nach der Trennung hat man dann die dünne Schicht (4) auf dem Trägermaterial (14) ohne das Substrat (6).

20

Ein besonderer Vorteil des hier beschriebenen Verfahrens kann in der Anwendung auf elektronische oder optoelektronische Bauelemente liegen, die auf einem nicht-leitenden Substrat hergestellt werden. In diesem Falle ist es häufig schwierig, an eine Substrat-nah liegende Halbleiterschicht einen elektrischen Kontakt zuzuführen. Diese verlangt häufig nach komplizierten Ätzprozessen und der Bildung von Mesostrukturen. Mit dem hier beschriebenen Verfahren lassen sich, wie in Abb. 8 gezeigt, solche Halbleitermaterialien, Schichtfolgen (4) oder Bauelemente von dem nichtleitenden Substrat ablösen. Die nun freigelegte, vorher substratzugewandte Seite des Bauelementes ist nun einfach zugänglich für elektrische Kontakte (18), zusätzlich zu dem elektrischen Kontakt (16) an der ursprünglichen Oberfläche der Schichtfolge.

25

30

Wichtige Prozeßschritte für das beschriebene Verfahren können sein:

- (i) die Identifizierung, Auswahl oder Herstellung einer zu trennenden Grenzfläche in dem gewünschten Schichtsystem, welche mit dem zur Trennung zu benutzenden Licht erreichbar ist,
- 5 (ii) die Identifizierung eines Materials, oder Einbau eines Materials als Opferschicht an der Grenzfläche, das das eingestrahlte Licht absorbiert.
- (iii) die Identifizierung eines Materials, oder Einbau eines Materials als Opferschicht in der Grenzflächennähe, das durch das absorbierte Licht oder daraus resultierende Energie zur Zersetzung gebracht werden kann und womöglich bei der Zersetzung ein gasförmiges
- 10 Produkt in ausreichender Menge erzeugt.
- (iv) die Beleuchtung mit Licht einer ausgewählten Wellenlänge und Intensität, so daß das Licht hauptsächlich von der zu trennenden Grenzfläche oder der Opferschicht absorbiert wird und dabei die Zersetzungsreaktion anregt, wobei im Falle transparenter Substrate die Grenzfläche oder Opferschicht auch durch das Substrat hindurch beleuchtet werden
- 15 kann.

Die Realisierung dieses Verfahrens ist von dem Materialsystem abhängig. Eine bevorzugte Ausführung für Halbleitermaterialien benutzt ein Material an der zu trennenden Grenzfläche mit kleinerer Bandlücke als alle andere Schichtfolgen oder Materialien zu einer Seite der

20 Grenzfläche. Dabei kann eine Lichtwellenlänge ausgewählt werden bei der das Licht bis zur Grenzfläche eindringen kann, und das von dem Material mit kleiner Bandlücke absorbiert wird. Dazu muß eine Zersetzung in diesem oder einem benachbarten Material induzierbar sein.

25 Dieser Prozeß ist besonders für Schichten oder Schichtsysteme der Gruppe III-Nitride geeignet, da diese Materialgruppe einige ausgezeichnete physikalische Eigenschaften aufweist. Erstens ist es möglich, Gruppe III-Nitride durch die Absorption von einzelnen Lichtpulsen über ihre Zersetzungstemperatur räumlich begrenzt und kontrolliert zu heizen. Bei den durch die Absorption von Lichtpulsen erzeugten Temperaturen setzt die Zersetzung der

30 Nitride und die Bildung von gasförmigem Stickstoff ein ( $600^{\circ}\text{C}$  -  $1800^{\circ}\text{C}$ , abhängig von der Zusammensetzung der Nitride). Zweitens ist es für die beschriebene Verfahrensweise hilfreich, daß die Schmelztemperaturen der Gruppe III-Nitride weit über den Zersetzungstemperaturen liegen, so daß es bei der Absorption intensiver Lichtpulse nicht zur Beeinträchti-

gung von Schichten und Bauelementen durch Schmelzen kommt. Drittens sind diese Halbleitermaterialien besonders für optische Prozesse geeignet, da sie in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts eine wohl definierte, scharfe Schwelle besitzen, eine direkte Bandlücke, an der sie von durchlässig zu vollständiger absorbierend wechseln. Weiterhin läßt sich die Wellenlänge, bei der die Absorption einsetzt, durch die Mischkristalle der Nitride (InGaN und AlGaN) über einen weiten Spektralbereich variieren (Bandlücken: InN 1.9 eV, GaN 3.4 eV, AlN 6.2 eV). Außerdem werden Gruppe III-Nitride oft auf Saphirsubstraten hergestellt, die im gesamten optischen und ultravioletten Bereich transparent sind. Dies macht auch eine Beleuchtung der Schichten durch das Substrat möglich.

In so einem Fall, wo die Zersetzung thermisch aktiviert wird, ist es wichtig daß die entstehende Wärme auf die Grenzfläche oder die Opferschicht konzentriert werden kann, einerseits um die nötige eingestrahlte Intensität zu minimieren, andererseits um unerwünschte Effekte auf das umgebende Material auszuschließen. Da die lichterzeugte Wärmemenge durch die thermische Leitfähigkeit der Materialien schnell aus den heißen Volumen abgeleitet wird, muß die notwendige Temperatur in einer sehr kurzen Zeit erzeugt werden. Dies kann durch kurze Laserpulse realisiert werden. Für typische Wärmeleitfähigkeiten der Gruppe III-Nitride kann die absorbierte Energie durch die Verwendung von Laserpulsen einer Dauer von 1 ns bis 10 ns auf die Eindringtiefe des absorbierten Lichts oder die Dicke der Opferschicht konzentriert werden. Für die Strukturierung und Zersetzung von Gruppe III-Nitriden eignet sich z.B. ein „Q-switched“ gepulster Nd:YAG Laser.

Als spezifische Ausführung für die lichtinduzierte Zersetzung der Materialien GaN und InGaN (Bandlücken zwischen 1.9 und 3.4 eV) kann die dritte harmonische Laserlinie eines Nd:YAG Lasers verwendet werden. Diese Laserlinie wird z.B. mit Hilfe eines nichtlinearen optischen Kristalls erzeugt und besitzt eine Wellenlänge von 355 nm (3.5 eV). GaN und InGaN Schichten absorbieren diese Lichtpulse und können zur Zersetzung gebracht werden. AlGaN Schichten und das meistens verwendete Saphirsubstrat sind für diese Wellenlänge transparent. Freistehende GaN und InGaN Schichten können direkt durch die Zersetzung der Grenzfläche Substrat-Schicht erzeugt werden. AlGaN Schichten und Bauelemente können durch die lichtinduzierte Zersetzung von dünnen GaN oder InGaN Opferschichten vom Substrat gelöst werden. In Abb. 7 ist schematisch gezeigt wie eine GaN Schicht (4) von einem beidseitig polierten Saphir Substrat (6) zu trennen ist. Die Grenzfläche zwischen GaN

und Saphir wird durch das Substrat hindurch mit einem einzelnen Laserpuls der Wellenlänge 355 nm beleuchtet. Das Licht wird nahe der Grenzfläche bis zu einer Tiefe von ungefähr 100 nm vom GaN absorbiert, wodurch die Grenzfläche geheizt wird. Werden Temperaturen von mehr als 850°C erreicht, setzt die Zersetzung des GaN unter Bildung von Stickstoffgas ein. Für Pulsenergien über ungefähr 0,2 J/cm<sup>2</sup> genügt die Energiedichte zur vollständigen Zersetzung an der Grenze, wodurch die Bindung zwischen dem Substrat und der GaN Schicht in der beleuchteten Fläche getrennt wird. Um die freistehende Schicht zu stabilisieren kann die Probe vor der Beleuchtung mit der Schichtseite unter Verwendung eines Harzes oder Waxes (12) auf eine Teflon® Scheibe oder Folie (14) geklebt. Ist die Schicht durch die Zersetzungsreaktion vom Substrat getrennt, läßt sich der Saphir abheben und die GaN Schicht bleibt auf der Teflonscheibe zurück. Nun läßt sich das Wachs oder der Harz in Aceton lösen und das GaN bleibt als freistehende Schicht zurück.

Bei der Strukturierung von GaN Schichten mittels Beleuchtung der Grenzfläche durch eine Saphirsubstrat, können ggf. die Seiten der zurückbleibende GaN-Strukturen nicht vertikal sein, sondern breiten sich von der Zersetzungsort aus, wie in Abb. 9 gezeichnet. Eine mögliche Anwendung für dieses Verhalten ist es, spitz- oder pyramidenförmig ausgebildete Strukturen (20) zu erhalten, wenn die laterale Breite des Interferenzgitters oder der Maske an die Schichtdicke angepaßt ist. Dieses Verhalten unterstützt auch die Herstellung freistehender Schichten wie in Anspruch 10 beschrieben.

Optoelektronische Bauelemente wie Leuchtdioden und Halbleiterlasern und elektronische Bauelemente wie Transistoren, Dioden, Oberflächenwellen-Bauelemente werden typischerweise in großer Zahl auf einem einzelnen Substrat hergestellt. Hier kann das beschriebene Verfahren der lichtinduzierten Strukturierung zur Trennung der einzelnen Bauelemente verwendet werden. Die Separation der Bauelemente vom Substrat kann wie bereits erwähnt durch die Zersetzung einer Opferschicht erfolgen, die während des Fertigungsprozesses unter oder über die zu trennende Fläche eingebracht werden muß. Hierzu eignen sich dünne InGaN Schichten aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Bandlücke und chemischen Stabilität besonders.

Verschiedene Bauelemente aus Gruppe III-Nitriden können durch die beschriebene Verfahrenswise strukturiert werden. Die Fertigung von periodischen Strichgittern und Oberflä-

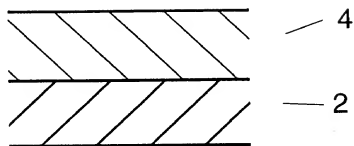
chenstrukturen mittels Beleuchtung mit einem Interferenzgitter kann vorteilhaft zur Herstellung von Bragg-Reflektoren und Distributed Feedback Lasern auf Gruppe III-Nitrid-Basis genutzt werden. Auch optische Dispersionsgitter, die ggf. auch für transmittiertes Licht benutzt werden können, lassen sich durch eine Variation der Dicke der Schicht mittels

5 Strukturierung mit einem Interferenzgitter erzielen. Pyramidale Strukturen aus AlN und AlGaIn können wegen ihrer negativen Elektronenaffinität als Kaltkathodenemitter z.B. in flachen Bildschirmen eingesetzt werden.

Die Produktion freistehender Schichten und Schichtfolgen erlaubt den Transfer von Gruppe

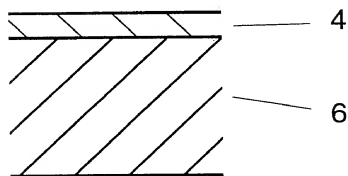
10 III-Nitriden auf andere Substrate (z.B. Silizium) die sich in ihren strukturellen, mechanischen und thermischen Eigenschaften stark von denen der Nitride unterscheiden können. Die Verfahrensweise erlaubt die Kombination von Leuchtdioden und Halbleiterlasern aus Gruppe III-Nitriden mit konventionellen Trägermaterialien zur Herstellung flacher Bildschirme oder die Integration solcher Bauelemente in Schaltungen und integrierte Schaltkreise.

15 Freistehende Schichtstrukturen können auch als optische Wellenleiter, und Lichtkoppler benutzt werden. Wenn dies mit einem Beugungsgitter strukturiert ist, kann das Licht durch das Gitter eingekoppelt werden. Schichten von spezifischer Dicke können auch als optische Filter angewendet werden.



Licht

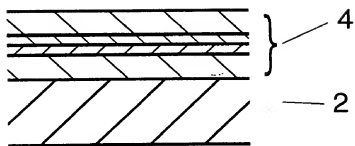
Abb. 1



Licht

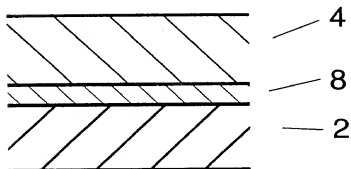
Abb. 2





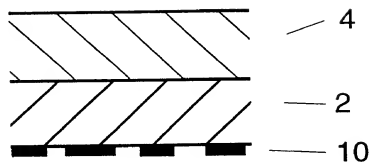
Licht

Abb. 3



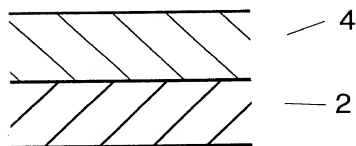
Licht

Abb. 4



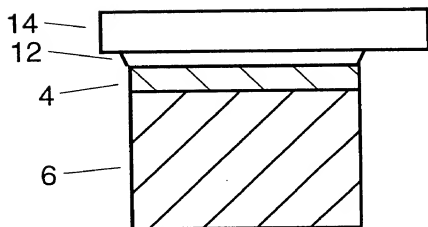
Licht

Abb. 5



Licht

Abb. 6



Licht

Abb. 7

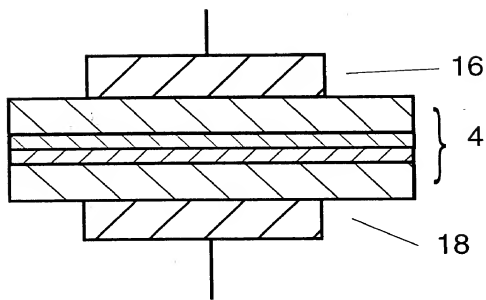


Abb. 8

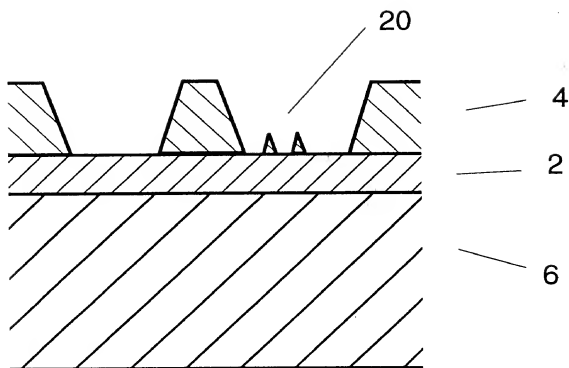


Abb. 9

## Zusammenfassung

- Ein Verfahren zur Trennung von Halbleitermaterialien, einschließlich der Gruppe III- Nitride, mittels licht-induzierter Grenzflächenzersetzung, und damit hergestellte Vorrichtungen wie strukturierte und freistehende Halbleiterschichten und Bauelemente. Das Verfahren beinhaltet die Beleuchtung von Grenzflächen zwischen Substrat und Halbleiterschicht oder zwischen Halbleiterschichten, wodurch die Lichtabsorption an der Grenzfläche oder in einer dafür vorgesehenen Absorptionsschicht zur Materialzersetzung führt. Die Auswahl der Grenzfläche oder Halbleiterschicht, welche zur Zersetzung gebracht wird, erfolgt durch die Wahl der Lichtwellenlänge und Lichtintensität, die Einstrahlrichtung oder den Einbau einer dünnen Opferschicht während der Materialherstellung.

LERNER AND GREENBERG, P.A.  
PATENT ATTORNEYS AND ATTORNEYS AT LAW  
POST OFFICE BOX 9480  
HOLLYWOOD, FL 33099-9480



BOX NO *FILED* RESPONSE  
ASST. COMMISSIONER FOR PATENTS  
WASHINGTON, D.C. 20231

